

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 21 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656052

研究課題名（和文）高温高圧下におけるペブル充填層多孔体内の乱流燃焼メカニズム解明

研究課題名（英文）On the mechanism of turbulent premixed combustion in a porous pebble bed at high pressure and high temperature

研究代表者

小林 秀昭 (KOBAYASHI HIDEAKI)

東北大学・流体科学研究所・教授

研究者番号：30170343

研究成果の概要（和文）：

高圧環境下においてペブル充填層内火炎伝播実験を行い、火炎伝播速度の測定および火炎断面構造の OH-PLIF 計測を行った。圧力の増大に伴う火炎伝播モードの変化が観察され、微細なマトリクス流路であるにもかかわらず、高圧下では乱流予混合火炎伝播の形態をとることが明らかとなった。また、火炎伝播限界流速が観測され、火炎による顕熱発生とペブルへの熱損失との競合により伝播限界が決まることがわかった。

研究成果の概要（英文）：

Flame propagation experiments were performed for a pebble bed at high pressure and high temperature. Flame speed in the bed was measured and OH-PLIF of the propagating flame front was performed. Results showed that the mode of the flame speed changed with increasing pressure and the flame becomes turbulent flame even though it propagates through very small matrix channels. Flame propagation limit was also observed and the limit was proved to be determined by the competition between heat release from the flame and heat loss to the pebbles.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,600,000	0	1,600,000
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	390,000	3,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：熱工学・燃焼工学・計測工学・環境技術・流体工学・乱流燃焼・高圧燃焼

1. 研究開始当初の背景

従来の燃焼学において、多孔体内燃焼は空隙長さスケールが火炎帯厚さと同程度か小さく、燃焼による発熱と多孔体固体との間の顕熱授受が現象を支配するとされてきたが、高圧環境下では空隙が小さい多孔体であってもレイノルズ数増大により乱流化し、かつ

火炎帯厚さが減少するため、乱流火炎伝播が生ずる条件があり得る。このような現象は、直径数 mm から数十 mm 程度のペブルを敷き詰めたペブル充填層を用いる触媒反応器や火炎阻止器の要素内で生じる現象であり、その高効率・安全設計において、充填層の内部に形成される予混合火炎の基礎特性を解明

することが不可欠である。

2. 研究の目的

高压環境下では空隙が小さい多孔体といえどもレイノルズ数増大により乱流化し、かつ火炎帯厚さが減少するため、微小空間に乱流火炎伝播が生じる可能性に着目し、この新しい多孔体内燃焼形態の存在とメカニズムに関して、雰囲気圧力と温度、予混合気流速、当量比、更にはペブルの物性が充填層内の予混合火炎伝播機構に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

図1に本研究で用いた三次元ペブル充填層燃焼器の概略を示す。これに加え、伝播火炎観測と乱流計測を目的とした図2に示すセラミックロッドを用いた二次元模擬充填層燃焼器も製作し実験に供した。三次元燃焼器では燃料および酸化剤はミキサー部で混合された後、内径50 mm、高さ100 mmの石英ガラスと直径 $d = 10$ mmおよび $d = 15$ mmのペブルから構成される充填層へ導かれ、充填層出口において加熱したニクロム線を用いて着火される。充填ペブルの材質として、工業的に多く用いられるアルミナのほか、熱伝導率が大きく異なるPYREX®ガラスを採用した。また燃料および酸化剤には、それぞれ室温のメタンおよび空気を使用した。燃焼器は東北大学流体科学研究所の高压燃焼試験装置内に設置され、雰囲気圧力および容器内温度を一定に保った状態で実験を行った。火炎伝播の様子は、高压容器の石英ガラス窓を通して高速ビデオカメラを用いて撮影された。

火炎伝播速度の解析に用いた層流燃焼速度 S_L は、CHEMKIN-II データベースおよびPREMIXコードを用いて計算した。メタンの詳細反応機構には、GRI-Mech ver3.0を使用した。

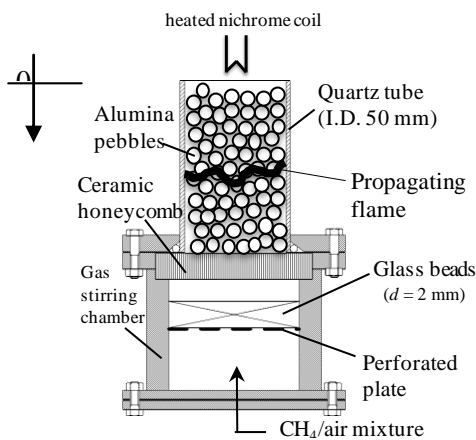


図1 三次元ペブル充填層燃焼器

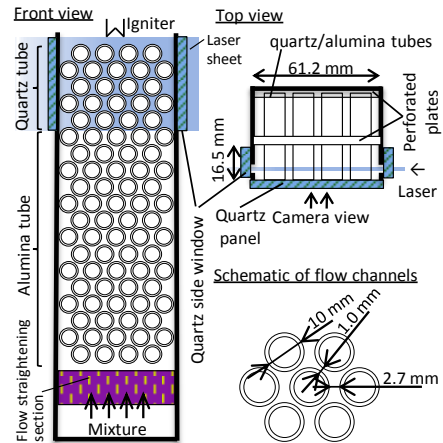


図2 二次元模擬充填層燃焼器

4. 研究成果

(1) 火炎伝播速度に対する雰囲気圧力の影響

火炎伝播実験において、火炎領域先端位置の時間履歴を高速撮影画像から求めた結果、いずれの雰囲気圧力でも火炎領域が一定の速度で伝播することがわかった。また当量比 ϕ 及び予混合気流速 U が同じ条件においても雰囲気圧力 P によって火炎移動速度が影響を受けることが分かった。このような火炎移動速度に局所予混合気流速を加えた実火炎伝播速度 S_r を下式で定義し、充填層内火炎伝播速度に対する圧力・予混合気流速等の影響を調べた。

$$S_r = S_{disp} + U/\epsilon^{2/3} \quad (1)$$

ここで S_{disp} は、充填層の高さを伝播に要した時間で除することで得られる火炎移動速度、 ϵ は充填層の空隙率である。

図3に、アルミナペブルを用いた場合における、層流燃焼速度 S_L で規格化した実火炎伝播速度 S_r/S_L と雰囲気圧力、予混合気流速、当量比との関係を示す。図より、大気圧下においては S_r/S_L が U と共に単調減少する(Mode I)のに対し、 $P = 0.2$ MPaでは極小値を持ち(Mode II)、また $P = 0.5$ MPa及び 1.0 MPaでは S_r/S_L が U と共に単調増加した(Mode III)。

図4にペブル直径を代表長さとするペブルレイノルズ数 Re_p と S_r/S_L との関係を示す。 S_r/S_L は $Re_p \cong 150$ を境に減少から増大に転じており、充填層内の流れ場が乱流に遷移することが知られているレイノルズ数に近く、二次元模擬充填層燃焼器による計測でも雰囲気圧力の増加に伴う乱流遷移が確認されており、図3に見られた火炎伝播モードの変化は、圧力及び予混合気流速の増加に伴う乱流遷移によるものと言える。すなわち低レイノルズ数条件では充填層内に層流火炎が形成され、予混合気流速の増大に伴う火炎面曲率

の減少により S_f/S_L が減少したのに対し、高レイノルズ数条件では充填層内に乱流火炎が形成され、乱流渦および火炎の流体力学的不安定性の効果も加わって、火炎面積が増大した結果、 S_f/S_L が増大したものと考えられる。

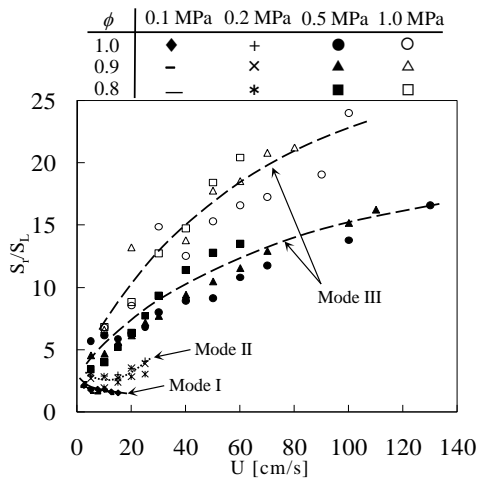


図3 無次元火炎伝播速度と平均流速の関係

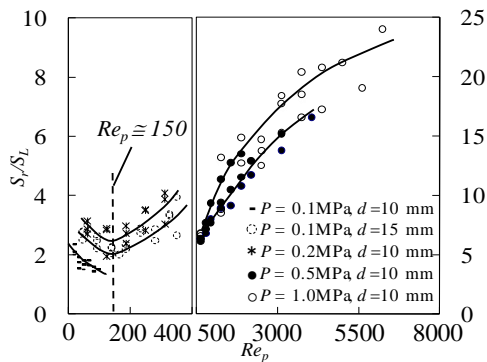


図4 ペブルレイノルズ数と無次元火炎伝播速度との関係

(2) 火炎の各特性スケールと充填層空隙スケールとの関係

乱流予混合火炎がペブル充填層内の空隙に形成されるためには、火炎帯厚さや消炎距離、境界層厚さ、火炎の最小凹凸スケール等の長さスケールが、充填層の空隙スケールに対して十分に小さい必要がある。図5に、これらの長さスケールと雰囲気圧力との関係を示す。ここで、 δ は熱理論による火炎帯厚さ、 d_p は消炎距離である。 d_b は平板に発達する乱流境界層厚さとした。また火炎の最小凹凸スケールは、Sivashinsky による線形安定性理論から求めた固有不安定性の特性スケール l_i を用いて評価した。大気圧下および $P = 0.2$ MPa においては、これらの長さスケールは充填層の空隙スケールと同じオーダーであるが、圧力が増加するにつれて減少し $P = 0.5$ MPa 以上の高圧下では空隙スケールに対して十分に小さくなる事が分かる。これらの結果は、高レイノルズ数条件において充填

層内に乱流火炎伝播が生じることを意味する。

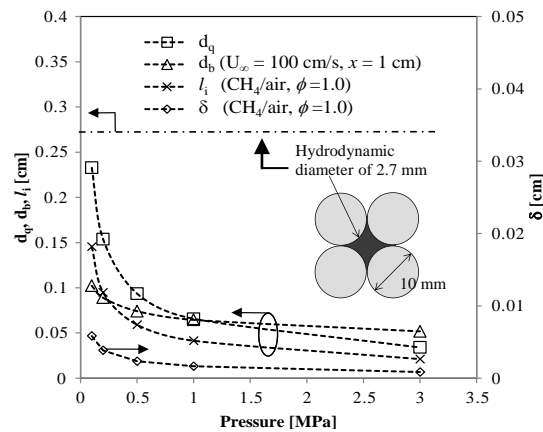


図5 各種特性スケールと圧力との関係

(3) ペブル材質が火炎伝播速度に及ぼす影響

充填物であるペブルの物性の違いが充填層内における予混合火炎の特性に及ぼす影響を調べるため、アルミナ及びPYREX®の2種類のペブルを用い、 $P = 0.5$ MPa の高圧下で実験を行った。

図6に、アルミナペブル及びPYREX®ペブルを用いた場合の、無次元火炎伝播速度 S_f/S_L と予混合気流速 U との関係を示す。 S_f/S_L と U の関係にペブル材質による明確な差は確認できず、充填材の熱伝導率の違いは、本研究のように高速で伝播する予混合火炎の伝播速度に大きく影響しないものと考えられる。すなわち本研究で対象とした充填層内を伝播中の火炎は、充填層を通した熱伝導による顕熱の再循環やペブル壁面におけるラジカルクエンチングの影響が支配的な系ではないことを意味している。

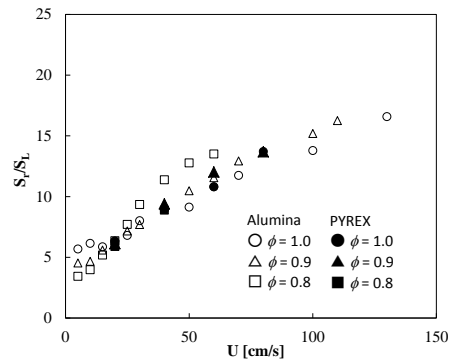


図6 無次元火炎速度へのペブル材質の影響

(4) 火炎伝播限界のメカニズム

本研究では、充填層内の流速を大きくすると消炎が起きる現象が観測された。これを火炎伝播限界と称する。充填層内燃焼の特殊現象であり、ペブル充填層を火炎阻止器として用いる場合の性能予測に関わる。ここでは、層流燃焼速度を用いたペクレ数の考え方を

充填層内乱流予混合燃焼に通用し、乱流火炎領域からの顕熱発生速度と、乱流火炎領域に含まれるペブルへの強制対流乱流熱伝達による熱損失との競合から火炎伝播が生じなくなるメカニズムを検討した。図7に、断面平均流速 U と熱発生速度・単位時間当たりの熱損失との関係の計算例を示す。ここで、層流燃焼速度および T_f は GRI-Mech ver. 3.0 を用いて計算し、 $T_w = T_u = 300 \text{ K}$ とした。図より断面平均流速 U がある程度増大したところで熱損失が熱発生を上回ることが分かる。またその際の断面平均流速 U は、実験結果と良く一致しており、このような考え方が適用可能であることがわかった。

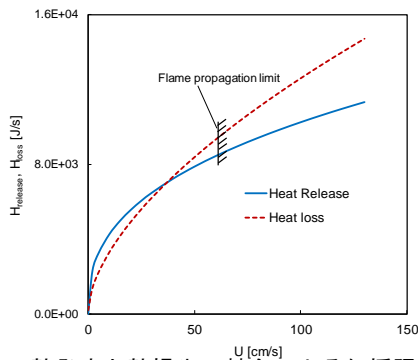


図7 熱発生と熱損失の競合による伝播限界の推算例

(5) OH-PLIF による伝播火炎構造の可視化結果

高压燃焼容器内に設置した二次元模擬充填層燃焼器に Nd:YAG/DYE レーザー光源からの紫外光を入射する実験・計測系を構築し、微小流路内の伝播火炎に対する OH-PLIF 計測を実施した。その結果、図8に示すように、大気圧下ではベンゼン型層流火炎が形成されるような予混合気流速においても、0.5 MPa 及び 1.0 MPa の高压下では火炎面に流路幅より十分に小さい凹凸を有する予混合火炎が形成されることが明らかになった。これは上述の多孔体内乱流予混合火炎伝播の存在を裏付けている。

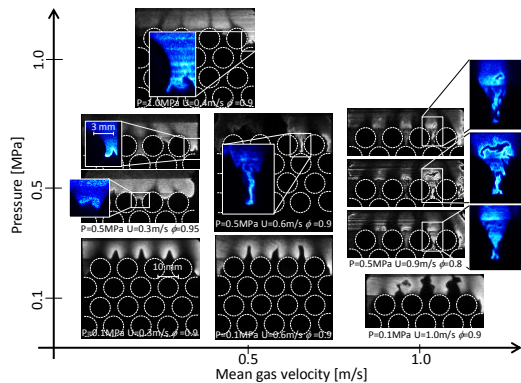


図8 OH-PLIF による二次元模擬充填層内伝播火炎の可視化結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① M. Okuyama, T. Suzuki, Y. Ogami, M. Kumagami, H. Kobayashi, Turbulent Combustion Characteristics of Premixed Gases in a Packed Pebble Bed at High Pressure, Proceedings of the Combustion Institute, 査読有, Vol.33,2011, pp.1639-1646.

[学会発表] (計5件)

- ① M. Okuyama, T. Suzuki, Jinhua Wang, Y. Ogami, H. Kobayashi, Flame Structure and Propagation Mechanism through Meso-Scale Flow Channel Network in a Packed Bed at High Pressure, The Eighth KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, 2012年3月19日 韓国(仁川市)
- ② M. Okuyama, T. Suzuki, Y. Ogami, M. Kumagami, H. Kobayashi, Turbulent Flame Propagation for Preheated CH_4/air Mixture in a Packed Pebble Bed at High Pressure, 8th Asia-Pacific Conference on Combustion, 2010年12月11日, インド(ハイデラバード)
- ③ 奥山昌紀, 鈴木拓朗, 大上泰寛, 熊上学, 小林秀昭, ペブル充填層内を伝播する乱流予混合火炎の基礎特性と雰囲気圧力の影響, 第48回燃焼シンポジウム, 2010年12月2日, 福岡県(福岡市)
- ④ M. Okuyama, T. Suzuki, Y. Ogami, M. Kumagami, H. Kobayashi, Effect of Pressure on Premixed Flame Propagation Mode in a Packed Pebble Bed Reactor, The Seventh International Conference on Flow Dynamics (7th ICFD 2010), 2010年11月1日 宮城県(仙台市)
- ⑤ M. Okuyama, T. Suzuki, Y. Ogami, M. Kumagami, H. Kobayashi, Turbulent Combustion Characteristics of Premixed Gases in a Packed Pebble Bed at High Pressure, The 33rd International Symposium on Combustion, 2010年8月5日, 中国(北京)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

〔その他〕
ホームページ等
http://cat-vnet.tv/movie/columbus/018_01.html

6. 研究組織

(1)研究代表者

小林 秀昭 (KOBAYASHI HIDEAKI)
東北大学・流体科学研究所・教授
研究者番号：30170343

(2)研究分担者

大上 泰寛 (OGAMI YASUHIRO)
秋田県立大学・システム科学技術学科・
准教授
研究者番号：00375122

(3)連携研究者

無し